

文章编号:1000-582X(2008)08-0848-06

# 最大仰视角的航天器测控设备选址方法

郭茂耘<sup>1</sup>, 张志芬<sup>2</sup>, 何京江<sup>2</sup>, 柴毅<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 自动化学院, 重庆 400030; 2. 西昌卫星发射中心, 四川 西昌 615000)

**摘要:**针对航天发射初始段测控设备布站受地形影响的问题,提出了一个基于最大仰视角的测控设备选址方法。以测控设备无遮挡最大仰视角的通视性分析方法为基础,在数字高程模型(digital elevation model, DEM)空间数据中,将航天器飞行星下投影点为中心,按照螺旋方式,以中心为起始点由里向外分析布站区域中 DEM 各网格点与航天器的通视性,通过比较航天器各时刻的通视性,得到某时段内覆盖航天器飞行弧段的可视区域,选择满足两两距离大于规定值的三个网格点作为测控设备选址地点。

**关键词:**通视分析;最大仰角;选址;测控设备

**中图分类号:**V216

**文献标志码:**A

## Site selection for a measuring and controlling device of initial phase based on maximum elevation angle

GUO Mao-yun<sup>1</sup>, ZHANG Zhi-fen<sup>2</sup>, HE Jing-jiang<sup>2</sup>, CHAI Yi<sup>1</sup>

(1. College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China;

2. Xichang Satellite Launch Center, Xichang 615000, P. R. China)

**Abstract:** We introduced a site selection method based on the modified maximum elevation angle intended for mountains possibly affecting the measurement and control of the initial phase in a launching port located in mountainous areas. To use the former analysis results, the method, along the helices whose center is the launcher's project point, analyze each point's visibility on the helices. The visible area can be obtained by comparing the visibility at each moment in the initial phase. Finally, there can be three points in the above visible area with distances longer than required.

**Key words:** visibility analysis; maximum elevation angle; site selection; measuring and controlling device

航天发射中,初始段是一个事故多发阶段,在国内外已有的发射失败中,多数是在初始段发生。因此,初始段的测控设备能否及时有效地跟踪飞行器,以获取弹道及遥测数据,对分析火箭飞行状态,发射指挥决策具有重要意义。当测控设备处于山区时,为了有效覆盖飞行弧段,雷达及遥测、光测等,测控设备的选址必须考虑到地形等因素的影响。

设备设施的选址需要考虑各种因素,为此,国内外学者分别就动物保护站<sup>[1]</sup>,消防队布局<sup>[2]</sup>,学校<sup>[3]</sup>,垃圾废物回收站<sup>[4]</sup>,雷达网优化布站<sup>[5]</sup>和应急服务系统<sup>[6-7]</sup>的选址展开了研究。就测控设备选址而言,其主要考虑的是在具体地理空间中测控设备与目标之间是否可视的问题,即通视分析的问题。其基本思路是在数字高程模型(digital elevation model, DEM)下,通过分析目标点和区域内各个观

收稿日期:2008-04-23

基金项目:国家 863 计划资助项目(2003AA132050)

作者简介:郭茂耘(1973-),男,重庆大学博士研究生,主要从事智能控制、地理信息系统等方向研究,

(Tel)66872770;(E-mail) gomorning@sina.com。

欢迎访问重庆大学期刊网 <http://qks.cqu.edu.cn>

察点的通视情况来实现通视分析。国内外学者分别就数字高程模型的基本原理和应用<sup>[8]</sup>,通视性分析方法及实验验证<sup>[9]</sup>,点对区域的通视性分析方法<sup>[10]</sup>,山地丘陵地形多点通视分析方法<sup>[11]</sup>,快速通视性算法<sup>[12-14]</sup>,以及通视分析在雷达组网优化布站<sup>[5]</sup>和房地产中的应用<sup>[15]</sup>等问题展开了研究。

## 1 最大仰视角的通视分析方法

### 1.1 最大仰视角的点对点通视分析方法

对于测控设备的选址,主要应考虑山体地形要素的遮挡,如图 1 所示。由于山体 H1,H2 的遮挡,观测点 A 在当前位置不能全程跟踪飞行器点 R,需要另行选择合适的地点,以确保观测点 A 能全程跟踪,或者跟踪弧段最大。

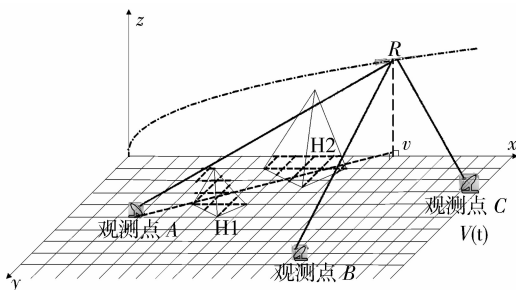


图 1 山体对测控目标的遮挡

基于最大仰视角的通视性分析基本原理是:首先沿观测点 A,目标点 R 及其在水平面的投影点 v 做一个垂直剖面,得到沿观测点到目标点视线的剖面地形,如图 2 所示。由近及远可以得到目标点与剖面中的地形轮廓点  $s_1, s_2, \dots, s_k, s_{i-1}$  和  $s_i$  仰角  $\angle bAs_1, \angle bAs_2, \dots, \angle bAs_k, \angle bAs_{i-1}$  和  $\angle bAs_i$  (其中,  $k=1, 2, \dots, i, i$  为以上剖面中的地形轮廓点总数)。将目标点 R 也看做是以上轮廓点中的一点,其仰角为  $\angle bAR$ 。

设  $AMAX_k$  为第  $k$  个地形轮廓点的最大仰角值(流动最大仰角),该值为记录了第  $k$  个地形轮廓点与视线点间所有轮廓点的最大视线仰角值,简称最大仰视角<sup>[10]</sup>。

于是,对于第  $k+1$  个地形轮廓点,如果  $\angle bAs_{k+1}$  的值大于  $AMAX_k$  的大小,则第  $k+1$  个地形轮廓点可视,且  $AMAX_{k+1}$  为  $\angle bAs_{k+1}$  的值。否则,第  $k+1$  个地形轮廓点不可视,  $AMAX_{k+1} = AMAX_k$ 。

重复以上分析过程,直到目标点 R 为止。就可以得到观测点 A 到 R 的通视分析结果。

根据以上过程,对图 2 中各轮廓点和目标点进

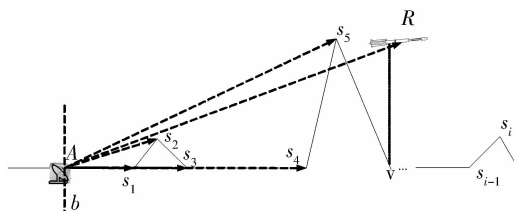


图 2 基于视线的点对点通视性分析

行通视分析,其中间结果和过程如表 1 所示,其中,初始最大仰视角值  $AMAX_0$  为 0。

表 1 基于最大仰视角的通视分析过程

节点	仰角	流动最大仰视角 $AMAX_k$	是否可视
$s_1$	$\angle bAs_1$	0	是
$s_2$	$\angle bAs_2$	$\angle bAs_1$	是
$s_3$	$\angle bAs_3$	$\angle bAs_2$	否
$s_4$	$\angle bAs_4$	$\angle bAs_2$	否
$s_5$	$\angle bAR$	$\angle bAs_2$	是
R	$\angle bAR$	$\angle bAs_5$	否

通过以上过程,可以得到  $s_1, s_2, s_5$  点可视,  $s_3, s_4, R$  不可视。

在数字高程模型(digital elevation model, DEM)空间数据中,已知观测点 A 的坐标为  $(x_A, y_A, z_A)$ ,目标点 R 的坐标为  $(y_R, z_R)$ ,其中  $(x_A, y_A)$  和  $(x_R, y_R)$  为以上两点对应的 DEM 网格坐标,  $z_A$  为由数字高程数据得到的观测点 A 高程值,  $z_R$  为目标点 R 的高度。目标点 R 对于观测点 A 的基于最大仰视角通视性分析算法如下<sup>[10]</sup>。

步骤 1:得到由 A 和 R 两点确定直线段方程  $l$ ;

步骤 2:在区间  $[x_A, x_R)$  中,依次取出每个网格坐标  $x_i$ ,通过步骤 1 确定的方程  $l$  得到对应的该网格坐标  $y_i$ ,进而通过 DEM 数据得到该网格的高程  $z_i$ ,与目标点 R 坐标序列  $(x_A, y_A, z_A), \dots, (x_i, y_i, z_i), \dots, (x_A, y_A, z_A)$ 。将以上序列依次用线段连接而得的折线就是从 A 到 R 点的剖面曲线;

步骤 3:根据最大仰视角原则,在步骤 2 中得到的序列中逐点计算观察到目标点的视角仰角。并根据最大仰视角原则进行分析比较,得到观察点和目标点的可见性。

### 1.2 基于最大仰视角的点对区域通视性分析方法

由前述可知,目标点对区域的通视分析是通过分析目标点和区域内各个观察点的通视情况来实现

的。而该分析过程的计算量较大。在一个以  $10\text{ km} \times 10\text{ km}$  的区域中,以  $10\text{ m} \times 10\text{ m}$  为网格单位间距,对于某一时刻的飞行器,需要进行  $1 \times 10^6$  次通视分析,而每次通视分析又需要若干次仰视角比较和计算。其计算量很大,具体时间复杂度分析见第 3 部分分析,需要进行优化。

分析以上最大仰视角的点对点通视性算法,可以发现以下特点:在基于最大仰视角的点对点通视性算法中,分析观测点和目标点间的通视性,需要计算连接观测点和目标点之间连线上的各点最大仰视角分析结果。

在 DEM 空间数据中,进行目标点对某区域的通视分析时,通过目标点和该区域内各网格点进行通视分析来实现的。每进行一次目标点和区域中某网格点的通视分析,都需要对目标点和该网格点连线间的各个网格点进行通视性分析,这样将导致大量重复分析和计算。笔者提出一种在 DEM 空间数据中逐点分析通视的方法。该方法以目标的投影点  $v$  为中心,按照如图 3 所示的螺旋形线轨迹,由里向外逐个分析计算轨迹所经过网格点的通视性。即按照:  $(i+1, j)$   $(i+1, j+1)$   $(i, j+1)$   $(i-1, j+1)$   $(i-1, j)$ ,  $(i-1, j-1)$ ,  $(i, j-1)$  ... 的顺序分析区域各个网格点与目标点  $R$  的通视性。

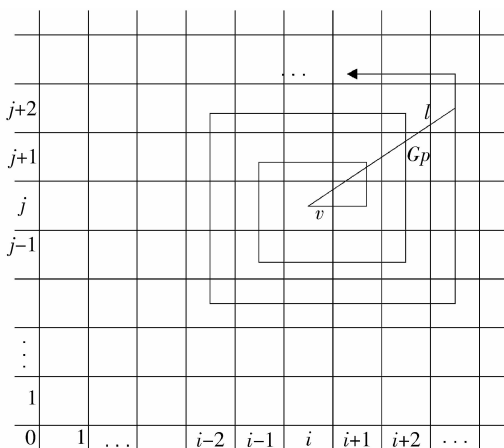


图 3 点对区域中各点的通视性分析顺序图

根据以上分析区域内各个网格点到目标点的通视分析顺序,其具体过程如图 4 所示。在图 4 所给出的算法中,是以目标点  $R$  的投影点  $v$  为中心,按照图 3 给出的螺旋方式,由里向外逐点分析螺旋线所经过的网格点与目标点通视性,包括该网格点与目标点通视与否的通视属性和该网格点与目标点的最大仰视角值。

由图 3 可以知道,在以上算法中,网格点  $(i+3,$

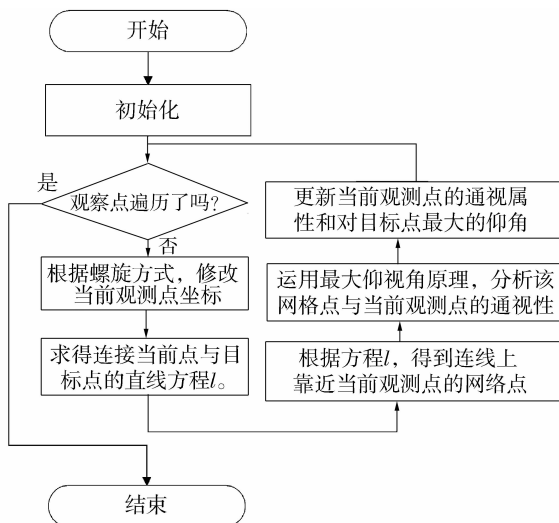


图 4 基于最大仰视角的点对区域通视性分析算法

$j+2)$ 与目标点的通视分析是通过网格点  $(i+3, j+2)$ 与  $Gp$  网格点(图 3 中为  $(i+2, j+1)$ )的通视分析完成的( $Gp$  为连接当前网格点与目标投影点的直线段  $l$  上距离当前网格点最近的网格点)。而  $Gp$  网格点的通视属性和其最大仰视角的求取与以上过程类似,通过点  $Gp$  与  $(i+1, j+1)$  进行通视分析得到。

由以上分析可以看出,按照本算法提出的通视分析方法,在对某网格点和目标点进行分析时,由于利用了前期通视分析结果,只需要进行该网格点与其对应的  $Gp$  点的通视分析,大大减少计算步骤。

### 1.3 算法时间复杂度分析

基于最大仰视角的通视性算法主要体现在目标点对各个网格点的通视性分析。因此,可以比较提出的算法和直接逐点分析各个网格点的复杂程度,分析计算通视性的实际点数为衡量标准。现以一个长为  $m$  网格,宽为  $n$  网格区域为例分析提出的算法时间复杂度。

对于某目标点,如果直接逐点分析区域内各网格点与该目标点的通视性,其主要分为以下两步:

- 1) 求得连接目标投影点和观察点的线段;
- 2) 在该线段中,按照基于最大仰视角的点对点通视性算法,逐点比较其与前一点的最大仰视角,并根据其比较结果进行更新。

由以上分析可知直接分析方法的复杂程度与连接目标投影点和观察点的线段长度有关,选择网格中线段的平均长度  $\sqrt{m^2 + n^2}/2$  来分析时间复杂程度。区域中每点需要进行通视分析的平均次数为

$$\text{INT}(\sqrt{m^2 + n^2}/2)。$$

因此,需要计算的点数为

$$mm \cdot \text{INT}(\sqrt{m^2 + n^2}/2) \approx$$

$$mm(\sqrt{m^2 + n^2}/2) \geq \frac{(mm)^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{2}},$$

其算法时间复杂度  $\geq O(\frac{(mm)^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{2}})$ 。

如图 3 所示,对于提出的基于最大仰视角的算法的点对区域通视算法,以目标投影点为中心,按照螺旋线方向,由里向外分析螺旋线经过各个网格点的通视性。在分析当前点时,所做当前网格点与目标点的垂直剖面必然经过先前已分析的各个网格点,因此可以利用已有计算结果,不必再对这些已分析过通视性的各个网格点再做通视分析,只需完成当前网格点与  $Gp$  网格点的一次通视分析。因此,对于一个  $mn$  区域的通视分析只需要完成  $m \times n$  次通视性分析。其时间复杂度为  $O(mn)$ 。

通过以上分析,可以看出按照提出的基于最大仰视角的点对区域通视算法的时间复杂度  $O(mn)$  小于直接逐点进行的通视分析方法算出的时间复杂度  $O(\frac{(mm)^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{2}})$ 。

## 2 测控设备选址算法

测控设备选址主要考虑的是测控设施能够尽可能多地覆盖运载火箭飞行弹道弧段。通过将运载火箭的理论弹道上各点作为目标点分析目标点与选址区域通视性,在选址区域内选择覆盖飞行弹道弧段最多的点作为测控设备选址备选点。

如图 1 在航天测控中,通常采用三站联合测量的方法对飞行器进行测量。对于图中 3 个测控站,其测控设备与飞行器间的距离如下:

$$\begin{cases} \sqrt{(x_R - x_A)^2 + (y_R - y_A)^2 + (z_R - z_A)^2} = R_{RA}; \\ \sqrt{(x_R - x_B)^2 + (y_R - y_B)^2 + (z_R - z_B)^2} = R_{RB}; \\ \sqrt{(x_R - x_C)^2 + (y_R - y_C)^2 + (z_R - z_C)^2} = R_{RC}. \end{cases}$$

其中,  $R_{RA}$ ,  $R_{RB}$  和  $R_{RC}$  可以由测控设备测得。在测控设备  $A$ , 测控设备  $B$  和测控设备  $C$  位置坐标  $(x_A, y_A, z_A)$ ,  $(x_B, y_B, z_B)$  和  $(x_C, y_C, z_C)$  已知的条件下,联立求解以上方程,可以求得飞行器坐标  $(x_R, y_R, z_R)$ 。因此,要完成对飞行器的测量工作,至少要设置 3 个测控设备。

根据前述方法,对运载火箭飞行弹道中的某时段  $[T_s, T_e]$  内各时刻进行通视分析。通过对各时刻的区域中各点通视性进行与运算,得到对该时段内弹道轨迹上各点都可见的区域网格点,该网格点为测控设备的选址地点。

图 5 给出了测控设备的选址过程。其中相关变量定义如表 2。

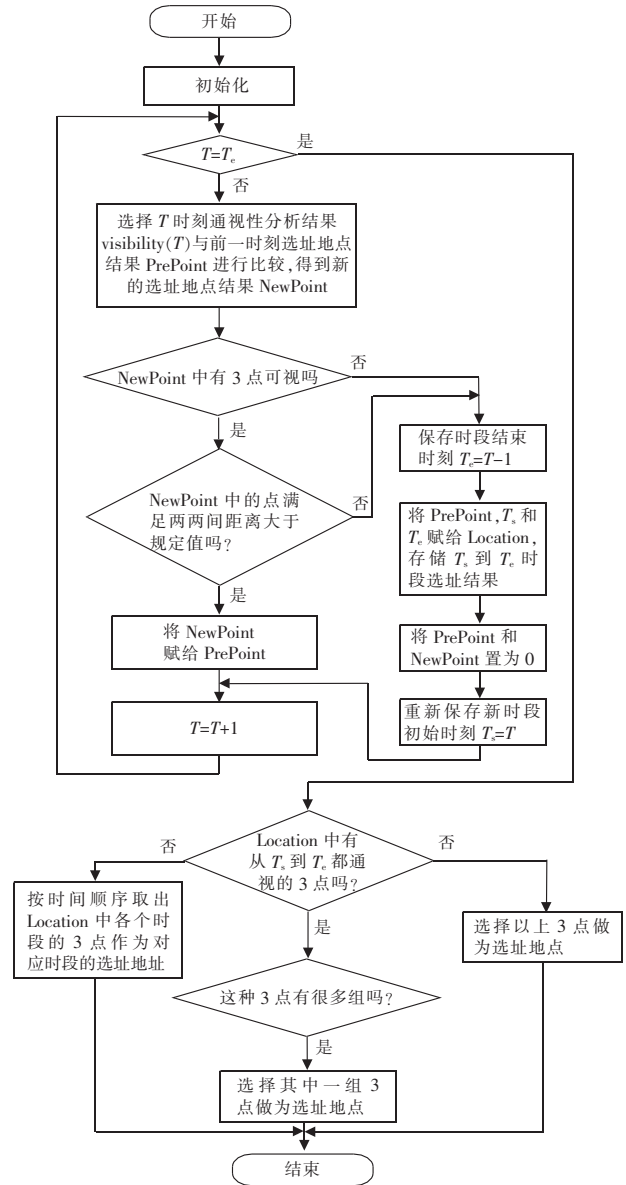


图 5 测控设备选址过程

表 2 选址算法中的变量定义

变量	意义
$visibility(x, y, T)$	存放 $T$ 时刻网格点 $(x, y)$ 的通视性分析结果
PrePoint	存放 $T_s$ 到 $T-1$ 时刻的通视性比较结果
NewPoint	存放 $T_s$ 到 $T$ 时刻的通视性比较结果
Location $(x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3, T_1, T_2)$	存放 $T_1$ 到 $T_2$ 时刻测控设备 3 个选址的地点 $(x_1, y_1)$ , $(x_2, y_2)$ 和 $(x_3, y_3)$

如图 5 所示,选址算法的基本原理是:对当前  $T$  时

刻通视性分析结果  $visibility(x, y, T)$  和前一时段  $(T_s, T-1)$  通视性分析结果  $PrePoint$ , 按对应网格进行通视性分析与运算, 按网格进行与运算, 得到  $T_s$  到  $T$  时刻的对目标点都可视的网格点  $NewPoint$ 。

当  $NewPoint$  中至少有 3 个以上的网格点对目标点可视, 且  $NewPoint$  中至少有 3 个以上网格点的两两距离大于规定值重复以上过程。

当上述 2 个条件之一不满足时, 以不满足时刻的前一时刻  $T-1$  为结束时刻,  $PrePoint$  中的 3 点为选址地点作为当前时段的选址结果存储在  $Location(x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3, T_1, T_2)$  中, 其中  $T_1 = T_s, T_2 = T_e$ 。然后将  $PrePoint$  和  $NewPoint$  置为 0, 重新保存新时段初始时刻  $T_s = T$ 。

继续进行以上分析过程, 直至  $T_e$  时刻。如果在  $Location$  中, 存在在  $[T_s, T_e]$  所有时刻中对目标点都有通视记录, 则将其作为选址地点, 如果有多条记录满足以上条件, 选择其中之一为选址地点。如果在  $Location$  中, 不存在所有时刻中对目标点都有通视记录, 则按照  $Location$  的起始时段  $T_1$  和结束时段  $T_2$  的顺序, 取出对应 3 个点作为各个时段的选址地址。

### 3 实验结果分析

如图 6 所示, 以  $5\text{ km} \times 5\text{ km}$  的区域为研究区域, 该区域的 DEM 数据以  $10\text{ m} \times 10\text{ m}$  为单位网格间隔, 利用 Matlab7.0 对提出的算法进行了验证。

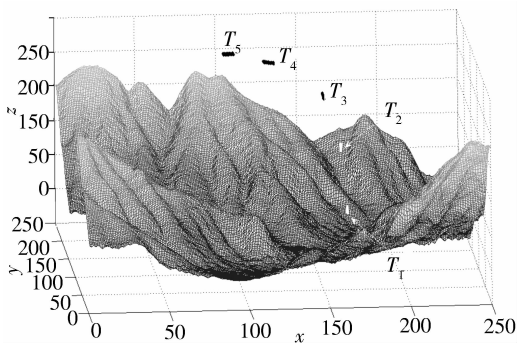


图 6 研究区域地形

图 6 所示为基于 DEM 数据的该区域三维地形及目标在不同时刻的位置示意图。其中  $x, y$  坐标表示 DEM 数据的网格标号, 在坐标为高程,  $T_1, T_2, \dots, T_5$  标识的是目标按照理论飞行弹道在某时段对应时刻的位置。

图 7 和图 8 为根据提出的基于最大仰视角方法的点对区域通视性方法, 得到的  $T_1$  和  $T_5$  时刻目标与该区域中各个网格点间的通视性分析结果。限于篇幅, 略去其它时刻的分析结果。图中  $x, y$  坐标表

示 DEM 数据的网格标号, 黑色表示对应  $x, y$  坐标的网格点可视, 白色表示对应  $x, y$  坐标的网格点不可视。

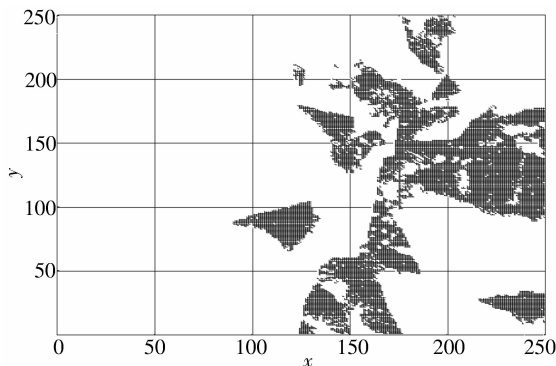


图 7  $T_1$  时刻的通视性分析结果

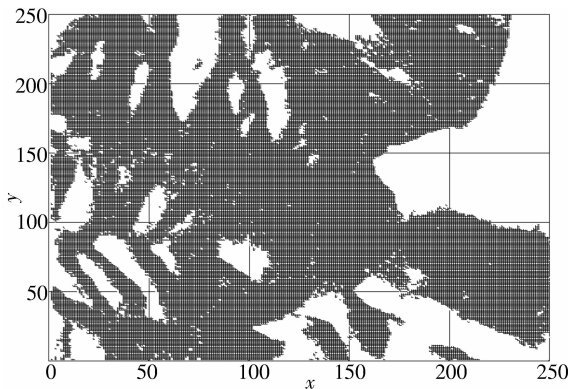


图 8  $T_5$  时刻的通视性分析结果

图 9 为按照提出的测控设备的选址算法, 在该时段内所有时刻, 区域内各个网格点与目标点的通视分析结果, 图中其中  $x, y$  坐标表示 DEM 数据的网格标号, 黑色表示对应  $x, y$  坐标的网格点可视, 白色表示对应  $x, y$  坐标的网格点不可视。图 10 为根据按照提出的测控设备的选址算法得到一组测控设备的备选地址, 其中  $x, y$  坐标表示 DEM 数据的网格标号。

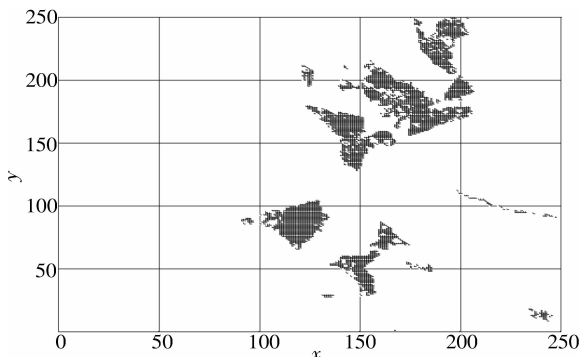


图 9 在某时段内所有时刻都可视的区域

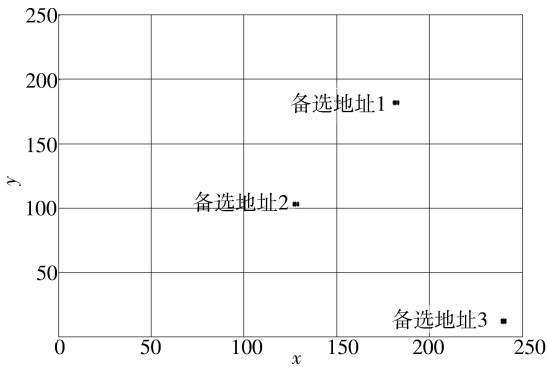


图10 测控设备布站备选地址

## 4 结 语

基于最大仰视角的通视算法,针对点对面的通视分析,以目标投影点为中心,按照螺旋方式,以中心为起始点由里向外分析区域中各点与目标点的通视性,实现点对面的快速通视分析。

在以上点对点通视分析算法的基础上,针对航天发射测控设备的选址,提出了一个测控设备的选址算法,实现了在 DEM 空间数据中测控设备的选址。并通过仿真对以上算法进行了验证。

### 参考文献:

- [1] WILLIAMS, JUSTIN C. Optimal reserve site selection with distance requirements [J]. Computers and Operations Research, 2008, 35(2): 488-498.
- [2] LIU N, HUANG B, LI C R, et al. Optimal siting of fire stations using GIS and ANT algorithm[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2006, 20(5): 361-369.
- [3] GIUSEPPE B. Using gravity models for the evaluation of new university site locations: a case study [J]. Computers and Operations Research, 2008, 35(2): 436-444.
- [4] KUMRAL M, DIMITRAKOPONLOS R. Selection of waste dump sites using a tabu search algorithm [J]. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 2008, 108(1): 9-13.
- [5] 何庆元. 基于粒子群优化算法的雷达网优化布站研究[D]. 广西: 桂林电子科技大学硕士学位论文, 2007.
- [6] 韩强. 多目标应急设施选址问题的模拟退火算法[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(30): 182-183.  
HAN QIANG. Simulated annealing algorithm for multi-object emergency location problem [J]. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(30): 182-183.
- [7] 方磊, 何建敏. 给定限期条件下的应急服务系统优化选

址模型[J]. 管理工程学报, 2004, 18(1): 48-51.

FANG LEI, HE JIAN-MIN. Optimal location model of emergency systems by a given deadline [J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2004, 18(1): 48-51.

- [8] WILSON J P, GALLANT J C. Terrain analysis: principles and applications [M]. UK: John Wiley & Sons, 2000.
- [9] 易敏, 丁明跃, 周成平. 四种通视性分析方法与实验比较[J]. 数据采集与处理, 1999, 14(1): 122-127.  
YI MIN, DING MING-YUE, ZHOU CHENG-PING. Comparison of four different visibility analyzing approaches [J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 1999, 14(1): 122-127.
- [10] 刘旭红, 刘玉树, 张国英. 利用最大仰角插值技术的通视性分析算法研究[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(5): 971-975.  
LIU XU-HONG, LIU YU-SHU, ZHANG GUO-YING. Visibility analysis using running maximum elevation angle interpolation [J]. Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics, 2005, 17(5): 971-975.
- [11] 张新源, 韩林, 杨化斌. 对山地丘陵地形多点通视区域建模的数学方法[J]. 测绘科学技术学报, 2006, 23(6): 464-466.  
ZHANG XIN-YUAN, HAN LIN, YANG HUA-BIN. The mathematic method related to modeling visible range of points in mountainous region [J]. Journal of Institute of Surveying and Mapping, 2006, 23(6): 464-466.
- [12] 王智杰, 邱晓刚, 李革. RSG 地形通视性快速算法设计[J]. 计算机仿真, 2004, 21(12): 92-95.  
WANG ZHI-JIE, QIU XIAO-GANG, LI GE. Design of fast inter-visibility algorithms over terrain given in RSG model [J]. Computer Simulation, 2004, 21(12): 92-95.
- [13] 应申, 李霖, 梅洋, 等. 增量法地形可视计算与分析[J]. 测绘学报, 2007, 36(2): 192-197.  
YING SHEN, LI LIN, MEI YANG, et al. Characteristics analysis of incremental terrain visibility [J]. Acta Geodaetica Cartographica Sinica, 2007, 36(2): 192-197.
- [14] 梁晓辉, 赵沁平. 改进的通视性检查算法[J]. 软件学报, 2002, 13(9): 1840-1845.  
LIANG XIAO-HUI, ZHAO QIN-PING. An improved intervisibility testing algorithm [J]. Journal of Software, 2002, 13(9): 1840-1845.
- [15] 杨朝辉, 党立华, 徐秀萍. 基于 ArcObject 的房地产通视分析系统的研制[J]. 测绘通报, 2003, 39(11): 54-59.  
YANG ZHAO-HUI, DANG LI-HUA, XU XIU-PING. Development of real estate visibility analysis system based on the arcobject [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2003, 39(11): 54-59.

(编辑 侯 湘)